

# Métodos novos para o Estudo das Rêdes Hidráulicas

*Eng.º Lucas Nogueira Garcez*

Professor Catedrático da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

*Eng.º José M. de Azevedo Netto*

Engenheiro da Repartição de Aguas e Esgotos de São Paulo

## INTRODUÇÃO

Dos vários órgãos constitutivos de um serviço de abastecimento d'água a um centro habitado nenhum excede em importância econômica à rede de distribuição; geralmente só o seu custo atinge de 60 a 70 % do total de todas as obras de abastecimento, chegando mesmo a 90 % nas pequenas coletividades, com captação e adução pouco onerosas. Daí a importância do problema do dimensionamento de uma rede de distribuição, problema que deveria merecer do projetista carinho todo especial, pois com uma análise mais racional do sistema distribuidor é possível obter redução substancial no custo e melhorar as condições de funcionamento da rede.

Entretanto, entre nós, infelizmente, nem sempre tal atenção é dispensada ao problema, e as consequências indesejáveis são logo evidenciadas, seja no mau funcionamento do sistema distribuidor por ocasião das grandes demandas, seja na frequência exagerada com que são feitos remanejamentos nos condutos principais de redes de distribuição relativamente novas.

Na última década, contribuições interessantes, devidas principalmente a engenheiros norte-americanos foram trazidas ao estudo dos condutos complexos. No presente trabalho, pretendem os autores dar maior divulgação a esses métodos novos de análise das redes hidráulicas, apresentando-os de modo a tornar possível a sua aplicação pelos nossos projetistas. Neste artigo serão abordados os seguintes tópicos: O problema geral de dimensionamento de uma rede de distribuição e sua indeterminação hidráulica; A solução rigorosa do problema e a sua impraticabilidade; As soluções aproximadas incluindo os vários critérios para a decomposição das malhas e os métodos modernos de tentativas diretas; e, As soluções experimentais por meio do analisador elétrico e do modelo hidráulico.

*O problema geral do dimensionamento de uma rede de distribuição*

O problema geral do dimensionamento de uma rede de distribuição pode ser assim enunciado:

Dadas as vazões e os comprimentos de cada um dos trechos dos encanamentos constitutivos da rede e as cotas piezométricas nas seções extremas das canalizações distribuidoras, determinar as cotas piezométricas em todos os nós de distribuição e os diâmetros de todos os tubos do sistema distribuidor.

Admitindo-se ser  $m$  o número de nós e  $n$  o número de trechos das canalizações, o problema contém  $m + n$  incógnitas ( $m$  cotas piezométricas e  $n$  diâmetros).

O número de equações distintas é apenas  $n$  — as equações de resistência em cada um dos trechos — pois as  $m$  equações da continuidade da vazão em cada um dos nós, representam, no caso, apenas condições a que devem se subordinar as vazões dadas.

Abreviadamente pode-se dizer que o problema geral do dimensionamento de uma rede de distribuição é hidráulicamente indeterminado, sendo  $m$  o grau de sua indeterminação.

Essa indeterminação pode ser levantada de duas maneiras:

a) — Diminuindo o número de incógnitas, como por exemplo, atribuindo arbitrariamente, ou com um critério pré-fixado, valores às cotas piezométricas nos nós; feito isso as  $n$  equações de resistência permitiriam o cálculo dos diâmetros;

b) — Aumentando o número de equações distintas, introduzindo novas relações que deverão se basear em condições não diretamente ligadas ao escoamento dos líquidos.

A primeira maneira de levantar a indeterminação do problema é a mais fecunda nas aplicações e é a que serve de base a todas as soluções aproximadas, inclusive aos chamados métodos novos de análise das redes hidráulicas; a segunda conduz à solução rigorosa do problema, procurando entre todas as soluções possíveis aquela que corresponde ao "optimum" econômico.

A pesquisa da condição de custo mínimo é extraordinariamente trabalhosa e impraticável no dimensionamento das redes de água, como se verá a seguir.

#### *A solução rigorosa do problema geral do dimensionamento de uma rede de distribuição e sua impraticabilidade*

Introduzindo as condições de custo mínimo determina-se para cada um dos nós de distribuição uma equação ligando o diâmetro à vazão de cada um dos trechos de encanamento que vão ter ao nó considerado (\*).

Sendo  $m$  o número de nós, tem-se assim  $m$  equações que, juntamente com as  $n$  equações de resistência nos trechos, determinam o problema.

Entretanto, o dimensionamento de uma rede de distribuição de água considerando-se as condições de custo mínimo apresenta dificul-

(\*) Lucas Nogueira Garcez: "Da condição de mínimo custo nos condutos forçados", Tese, 1946, pp. 82 a 83.

dades de cálculo verdadeiramente insuperáveis. Um primeiro impecilho sério resulta das dificuldades puramente matemáticas na resolução de um sistema de  $m + n$  equações, sendo  $m$  e  $n$  consideráveis mesmo no caso de pequenas rêdes, dificuldades essas que são acrescidas ainda pela natureza e grau das equações.

Outros obstáculos existem e êsses ligados às condições de bom funcionamento das rêdes, de vez que nem sempre as soluções rigorosas são aceitáveis na prática, pois os diâmetros, as velocidades e as cargas disponíveis têm variações limitadas nas aplicações. Assim é que por exemplo, a carga hidráulica disponível em um ponto qualquer da rêde deve ser tal que garanta nos prédios a alimentação dos reservatórios e aparelhos sanitários situados acima do rez do chão, e, possibilite, dentro de um limite razoável, o serviço público de proteção contra incêndios. De modo análogo, os diâmetros, mesmo nos ramais extremos e de pequena importância, não devem descer abaixo de um certo limite, tendo em vista a possibilidade de incrustações, a facilidade das ligações dos ramais domiciliários à rêde pública e a boa circulação nos sistemas malhados. Há a considerar ainda que a determinação analítica dos diâmetros para o sistema mais econômico é prejudicada pelos seguintes fatores (\*\*):

- 1) — Variações relativamente grandes em tôrno do diâmetro mais econômico afetam pouco o custo total do sistema;
- 2) — Os diâmetros comerciais serão obrigatòriamente empregados, sejam ou não os determinados analiticamente pelas condições de custo mínimo;
- 3) — As previsões de vazão e de custo não podem ser feitas com apuro para todo o período de serviço útil considerado no projeto;
- 4) — O diâmetro econômico varia com as condições de utilização do sistema.

Por essas e outras razões não se justifica o cálculo matemático rigoroso mas laboriosíssimo das rêdes de distribuição de água potável pela condição de mínimo custo.

*As soluções aproximadas — Generalidades — Seccionamento dos circuitos fechados — Críticas*

Surgem então as soluções aproximadas, práticas. Nelas ou se admite um conjunto de condições ligadas ao eficiente funcionamento da rêde, fazendo-se a determinação dos elementos incógnitos restantes por tentativas diretas, ou se considera o conduto complexo, malhado, seccionado por oportunos pontos de separação, em condutos ramificados, os quais são então dimensionados com maior facilidade.

Os autores norte-americanos procuraram solucionar o problema, de preferência por meio de tentativas diretas, tendo sido estabelecidos

---

(\*\*) C. V. Davis, "Handbook of Applied Hydraulics", McGraw-Hill Book Co. Inc., 1942, p. 729.

vários métodos, cuja maior vulgarização constitui o objetivo principal do presente trabalho.

Os critérios de decomposição das malhas em ramificações foram os preferidos pelos autores europeus e ainda hoje são os mais difundidos no Brasil. Por êles seccionam-se os circuitos fechados, transformando-se a rede malhada em um sistema ramificado, no qual "a priori" se estabelece o sentido do movimento da água, isto é, os critérios de decomposição permitem fixar o trajeto que a água deverá seguir para atingir um ponto qualquer da rede.

Dois são os principais critérios para a fixação desse trajeto: o de Frühling e o de Lüger-Mannes.

No critério de Frühling, as canalizações são consideradas como condutos livres que devem irrigar toda a região da cidade a ser abastecida, aproveitando-se destarte os desníveis disponíveis do melhor modo possível. Como imediata consequência, as canalizações mais importantes devem alimentar os pontos que, sendo mais elevados, podem suportar as menores perdas de carga. No que se refere ao custo da rede, pode-se apontar, de início, o principal inconveniente do critério de Frühling: a água, cujo trajeto é estabelecido em função exclusiva das condições altimétricas, percorre geralmente um caminho indireto, mais longo, afastando-se assim das condições de despesa mínima.

O critério de Lüger-Mannes funda-se na hipótese de que a água, para atingir um determinado ponto da rede, deve percorrer o trajeto mais curto possível. É o critério mais empregado no seccionamento, pois além de fornecer um método simples para determinar a distribuição das vazões, dá geralmente lugar a resultados próximos da solução rigorosa.

Critérios mistos são também empregados, como o da localização prévia do conduto ou condutos principais, tendo em vista não apenas as condições altimétricas e de demanda como também o trajeto mais curto possível.

Todos os critérios de seccionamento são passíveis de uma crítica geral: os sistemas distribuidores por êles dimensionados ficam dependentes de um pequeno número de condutos, e o seu funcionamento, na maior parte dos casos, não difere muito do das redes ramificadas.

Algumas das vantagens do sistema malhado são assim perdidas e o comportamento das redes por ocasião de um consumo excessivo, como por exemplo o que poderá ocorrer durante incêndios ou horas de grande demanda, é insatisfatório ou pelo menos incerto.

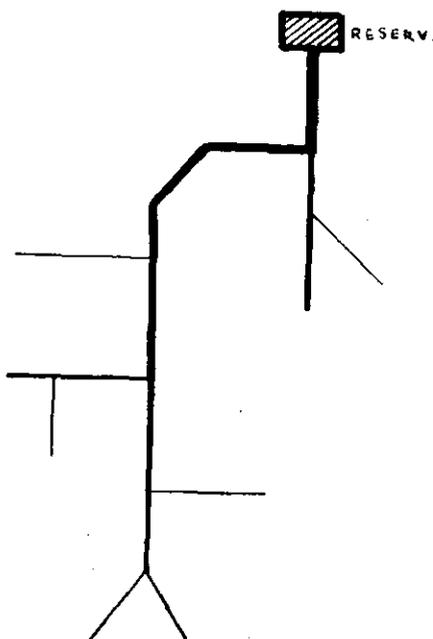


Fig. 1 — Rede Tipicamente Ramificada

Uma boa parte dos defeitos de distribuição em nossas cidades decorre dessa falha de projeto. Os inconvenientes atrás apontados justificam a tendência moderna para o uso dos métodos de tentativas diretas na análise de um sistema distribuidor. Em alguns desses métodos se admite em primeira tentativa uma certa distribuição das vazões ou das

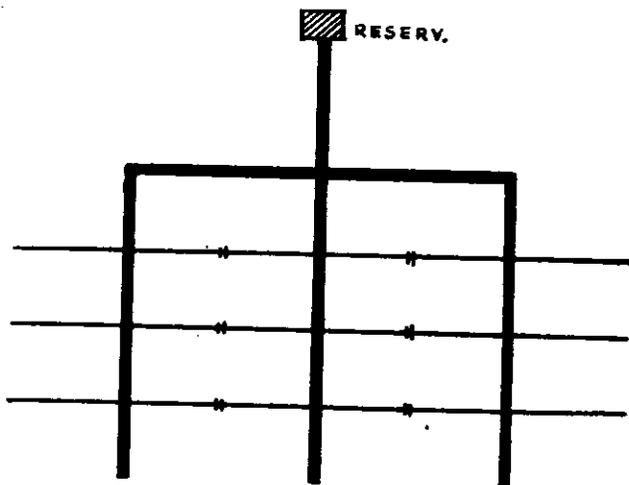


Fig. 2 — Rêde Tipicamente Malhada Assimilada à Ramificada.

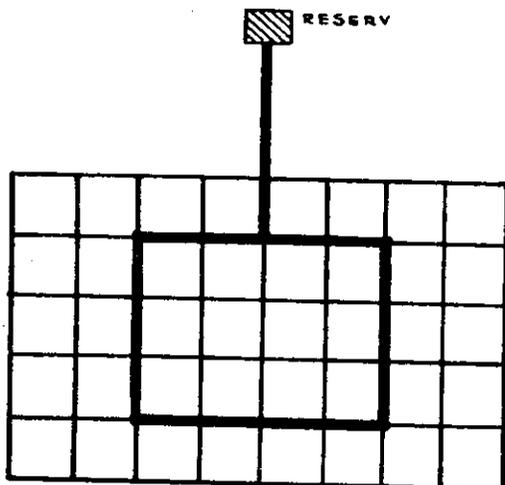


Fig. 3 — Rêde Tipicamente Malhada

perdas de carga em todo o sistema, calculando-se as perdas de carga ou as vazões nos diversos trechos, ajustando-se, em seguida, as distribuições dos valores por meio de novas tentativas, até que sejam verificadas as condições hidráulicas conhecidas inicialmente. Entre os métodos de tentativas diretas indicaremos o de Freeman, o do círculo, o de Pardoe ou das zonas, o de Hazen ou das secções e o de Hardy Cross.

### *Método de Freeman*

Os tratados de Hidráulica definem como condutos equivalentes os que, sob a mesma carga transportam a mesma vazão. O conceito de equivalência de condutos é empregada na solução de importantes questões nos condutos forçados, como por exemplo, na substituição de um conduto misto ou de um sistema de canalizações por um conduto único de diâmetro constante (Regra de Dupuit).

A aplicação do princípio dos condutos equivalentes se baseia nos dois axiomas seguintes:

- 1) — As perdas de carga em canalizações em série são aditivas;
- 2) — As vazões em condutos em paralelo devem ser tais que a perda de carga seja a mesma para todos êles.

Evidentemente, para um conduto complexo, mesmo simples, como o indicado na fig. 4, não se pode obter um conduto equivalente, porém, com um certo critério, é sempre possível reduzir as rêsdes de abastecimento aos seus elementos principais, para os quais, muitas vêsdes o método dos condutos equivalentes pode ser vantajosamente aplicado.

O chamado método de Freeman consiste na substituição sistemática das malhas de uma rêsde por condutos equivalentes, determinados gráficamente por um interessante processo.

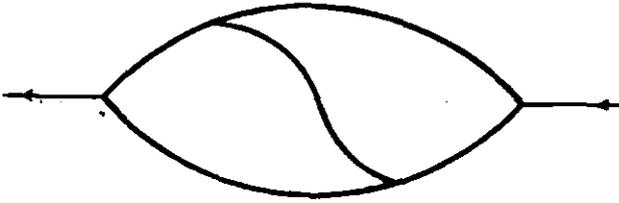


Fig. 4 — Sistema Indeterminado

Foi estabelecido em fins do século passado com o objetivo inicial de aplicação às rêsdes de proteção contra incêndios, tendo sido, alguns anos depois, desenvolvido e aplicado às rêsdes de distribuição em geral.

Tomando-se as vazões em abcissas e as perdas de carga em ordenadas, e, construindo-se uma curva para cada canalização, pode-se determinar mediante simples adição gráfica a equivalência para vários condutos em série (somando-se as ordenadas) ou em paralelo (somando-se as abcissas):

Limita-se êsse método, portanto, aos casos em que o princípio da equivalência possa ser aplicado conceitualmente ou por assimilação.

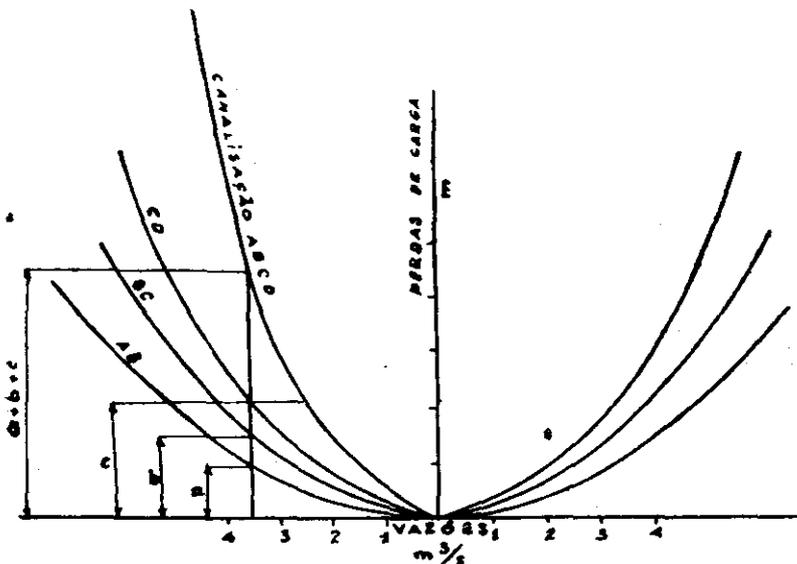


Fig. 5 — Método Gráfico de Freeman

O desenvolvimento dado posteriormente ao método gráfico, por Howland e Aldrich (\*) veio generalizar o seu emprêgo, possibilitando a sua aplicação a sistemas mais complexos. Entretanto, quando aplicado a êsses sistemas, o método requer muito trabalho, resultando daí ser pouco prático quando comparado ao método de Hardy Cross.

### Método do Circulo

É um método auxiliar, aproximado, bastante empregado no estudo de canalizações secundárias e mais frequentemente na verificação da quantidade de água disponível para incêndios em determinada área, compreendida por uma circunferência de raio pré-estabelecido.

Pressupõe-se que os condutos principais tenham sido previamente bem dimensionados, sendo a água fornecida radialmente pelas canalizações seccionadas pela circunferência adotada.

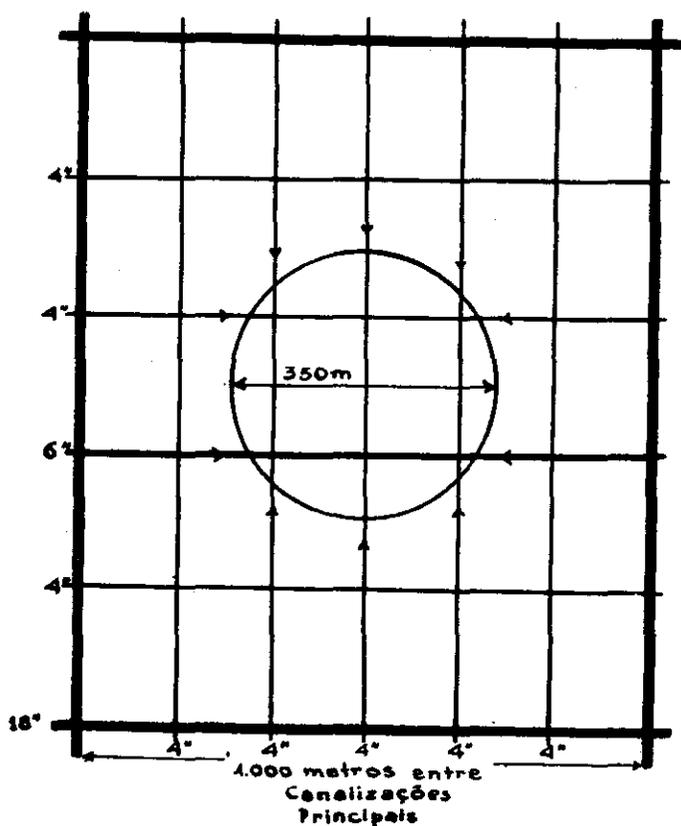


Fig. 6 — Método do Circulo

Conhecidas a densidade demográfica da zona em estudo, a demanda máxima por habitante e a água necessária em caso de incêndio,

(\*) O interessante trabalho de Aldrich foi apresentado à American Society of Civil Engineers, tendo colaborado na sua discussão, o engenheiro F. Knapp da The São Paulo Tramway, Light & Power Co. Ltd.

chega-se à vazão total exigida na área do círculo adotado. Pode-se verificar então se as canalizações seccionadas têm capacidade para atender àquela solicitação, quer fixando-se as velocidades máximas nos encanamentos quer admitindo-se a pressão mínima a ser mantida no círculo.

*Método do contôrno, das zonas, ou de Pardoe*

O método estabelecido por Pardoe, professor de Engenharia Hidráulica da Universidade da Pennsylvania, é um método geral, aplicável ao estudo ou verificação dos sistemas complexos, levando em consideração não somente os condutos principais, mas também os secundários.

Para efeito de cálculo procura-se substituir o sistema complexo por uma canalização fictícia, equivalente.

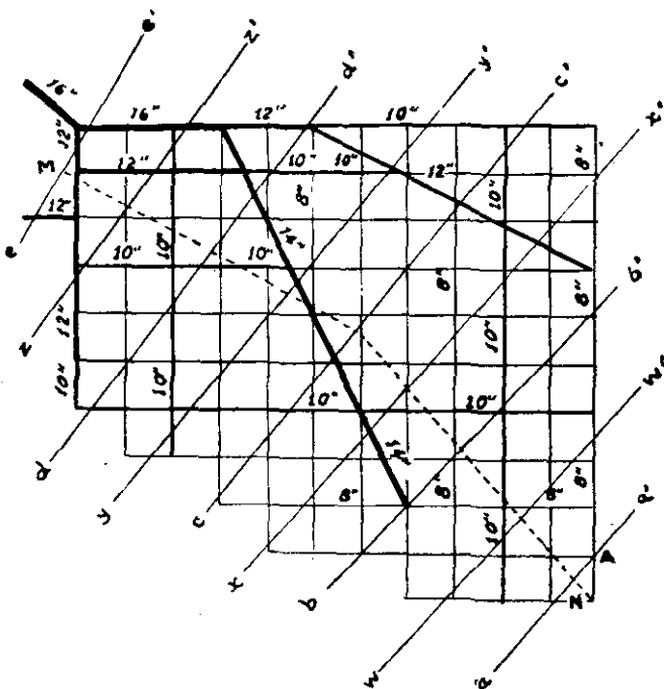


Fig. 7 — Método de Pardoe

Para isso tomam-se secções quaisquer  $aa'$ ,  $bb'$ ,  $cc'$ ... partindo-se do extremo juzante da rede em direção à montante; o conduto equivalente  $MN$  é suposto passar pelos pontos médios dessas secções, coincidindo portanto, com a "direção geral" de escoamento na rede.

A demanda de água pode ser estimada para a unidade de área, levando-se em conta a densidade de população e o tipo de distrito em estudo. A perda de carga total de um extremo a outro da rede também é um dado do problema, pois geralmente se estabelece a pressão mínima a ser mantida em qualquer ponto do sistema.

É possível então determinar a quantidade de água solicitada a juzante de cada secção, o número de canalizações disponíveis e sua vazão total, e determinar o diâmetro do conduto equivalente. Conhecido esse diâmetro se obtém a perda de carga entre as duas secções consideradas.

Calculando-se pelo mesmo processo as perdas  $bb'-cc'$ ,  $cc'-dd'$ , etc. chega-se à perda total entre os extremos.

O método de Pardoe tem sido utilizado como uma primeira aproximação para a aplicação do método de Hardy Cross.

### *Método de Hazen ou das Secções*

O método de Hazen, empregado pelo grande engenheiro sanitário americano, é um processo aproximado e de grande simplicidade.

Semelhante ao método de Pardoe, porém mais simples em conceito e em aplicação, o método das secções se presta à verificação expedita de sistemas de distribuição existentes.

Como no caso anterior, consideram-se várias secções, passando-se porém a verificar se as canalizações existentes entre as mesmas são suficientes ou não. Essa verificação é feita assumindo-se valores razoáveis para a velocidade ou para a perda de carga. Se as canalizações não forem suficientes, procede-se então ao seu reforço, adicionando-se ou substituindo-se encanamentos na região considerada.

### *Método de Hardy Cross*

Em 1936 Hardy Cross, então professor de Engenharia Aplicada às grandes Estruturas, da Universidade de Illinois (\*), imaginou e estabeleceu um método simples e suficientemente preciso para o estudo de estruturas hidráulicas, o qual foi logo reconhecido como o método ideal para a solução do problema constituído pelos encanamentos complexos.

O método de Cross sofreu pequenas modificações e adaptações que tornaram a sua aplicação ainda mais rápida e fácil. A primeira modificação, introduzida pelo professor Doland, consiste em se proceder às determinações tomando-se porcentagens da vazão total, o que conduz a resultados mais generalizados. Alguns autores chegaram por isso a dar uma nova denominação ao método assim modificado: "Método de Cross-Doland".

Outra contribuição foi dada pelo professor Fair, com o objetivo de tornar o método mais prático, possibilitando o emprêgo das tábuas e régua de cálculo hidráulicas comuns ao invés de tabelas ou ábacos especiais.

Ainda com o objetivo de reduzir o trabalho de cálculo, os engenheiros Howland e Farr Jr. apresentaram interessantes sugestões baseadas no método tal como foi simplificado por Fair.

(\*) Atualmente professor de Engenharia Civil na Universidade de Yale.

Merecem menção os nomogramas que foram idealizados e especialmente construídos para facilitar a aplicação deste método, entre os quais são mais conhecidos os de E. R. Dodge (Wisconsin, U. S. A.), George M. Slight (Santiago, Chile), H. Shand (Winnipeg, Canadá) e T. F. O'Connor (War Department, Washington, U. S. A.).

Com o método de Hardy Cross os ajustamentos feitos sobre os valores previamente adotados são *computados* e, portanto, controlados, resultando uma rápida convergência para os erros. Por isso raramente são necessárias mais do que três tentativas.

Para a sua aplicação rápida às grandes rêsdes é comum dividir as cidades em setores para o estudo individual de cada setor, e também reduzir a rêsde hidráulica aos seus elementos principais, formando o que se costuma denominar o "esqueleto" da rêsde. Do critério do engenheiro dependerá então a precisão da análise. Outra simplificação de que geralmente se lança mão é a substituição de canalizações em série ou em paralelo por condutos equivalentes (\*).

Duas são as modalidades segundo as quais o método pode ser aplicado: Fazendo-se o ajustamento para as cargas ou para as vazões; a segunda modalidade é a mais comum.

No ajustamento das vazões valem as considerações seguintes:

Para cada trecho de canalização do sistema poder-se-á escrever:

$h = r Q^n$ , em que  $h$  é a perda de carga,  $Q$  a vazão,  $n$  um expoente próximo de 2 (Na fórmula de Hazen e Williams  $n$  é igual a 1,85) e  $r$  o coeficiente de resistência, função do comprimento e diâmetro do encanamento e do seu coeficiente de rugosidade.

Pressuposta inicialmente uma certa distribuição para a vazão, para cada circuito pode-se determinar  $\Sigma h = \Sigma r Q^n$ .

Caso a distribuição previamente adotada fôsse a verdadeira, numa malha ou circuito fechado,  $\Sigma h = \Sigma r Q^n = 0$ . Isto não se verificando, a vazão  $Q$  que deve ser "ajustada", aumentando-a ou diminuindo-a de  $\Delta Q$ , que pode ser calculado baseando-se no seguinte raciocínio: Suposto seccionado o circuito fechado no ponto de separação, a perda de carga no circuito à direita do ponto de separação,  $\Sigma_d h = \Sigma_d r Q^n$ , deveria ser igual a perda de carga no circuito à esquerda  $\Sigma_e h = \Sigma_e r Q^n$ .

Se a diferença entre elas,

$\Sigma_d h - \Sigma_e h = \Sigma_d r Q^n - \Sigma_e r Q^n$  fôr diferente de zero, dever-se-á "ajustar" o valor de  $Q$ , de modo a tornar a diferença nula. Por exemplo, se  $\Sigma_d h > \Sigma_e h$ , então deve-se diminuir o valor da vazão adotada no circuito à direita e aumentar a do circuito à esquerda de um  $\Delta Q$  tal que:

$$\Sigma_d r (Q - \Delta Q)^n = \Sigma_e r (Q + \Delta Q)^n$$

(\*) Na análise de tãda a rêsde da cidade de Ottawa, Illinois, feita pelos engenheiros Farnsworth e Rossano Jr. foram necessárias cêrca de 30 homens-horas, enquanto que a mesma rêsde simplificada pôde ser analisada completamente com apenas 10 homens-horas.

Desenvolvendo os binômios e desprezando os termos a partir de  $(\Delta Q)^2$ , teremos aproximadamente:

$$\sum_d r (Q^n - nQ^{n-1} \Delta Q) = \sum_e r (Q^n + nQ^{n-1} \Delta Q)$$

e

$$\Delta Q = \frac{\sum_d r Q^n - \sum_e r Q^n}{n (\sum_d r Q^{n-1} + \sum_e r Q^{n-1})} = \frac{\sum_d h - \sum_e h}{n \sum r Q^{n-1}}$$

e ainda como

$$h = r Q^n \quad r Q^{n-1} = \frac{h}{Q}$$

$$\Delta Q = \frac{\sum_d h - \sum_e h}{n \sum \frac{h}{Q}} \quad (1)$$

Embora a equação acima não seja matematicamente exata, ela dá uma aproximação razoável, compatível com o fim a que se destina. Mesmo que os valores adotados inicialmente estejam bastante fora da realidade, na segunda ou, no máximo, na terceira tentativa os valores obtidos já são geralmente satisfatórios.

O método de Hardy Cross se aplicará pois às rédes de distribuição do seguinte modo:

- 1 — Adota-se uma certa distribuição das vazões;
- 2 — Calcula-se em cada circuito a perda de carga. Se as perdas de carga para os dois circuitos de u'a malha forem diferentes, determina-se a diferença  $\sum_e h - \sum_d h$ , ou  $\sum_a h - \sum_c h$ ;
- 3 — Ajusta-se a vazão em cada circuito, somando ou subtraindo das vazões admitidas a quantidade  $\Delta Q$  determinada pela relação (1);
- 4 — Recalculam-se as perdas de carga em cada circuito e determina-se a nova correção para as vazões;
- 5 — Repete-se o processo até que a aproximação desejada tenha sido obtida.

Na sua aplicação o método de Hardy Cross é bastante facilitado com o tabulamento conveniente dos dados conhecidos e calculados e com o recurso de ábacos e tabelas.

Desde a ocasião em que foi publicado pela primeira vez, o método de Cross tem sido aplicado na investigação ou revisão de rédes de abastecimento de água de inúmeras cidades, com resultados excelentes.

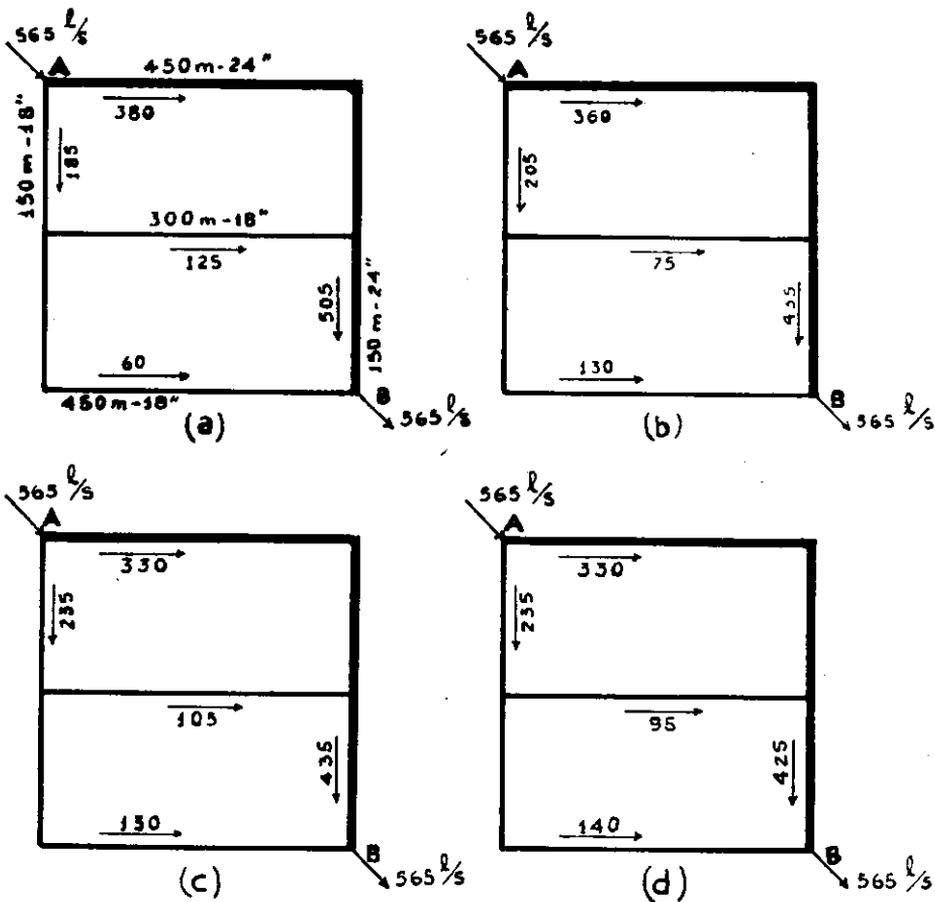


Fig. 8 — Problema típico, resolvido pelo Método de Cross. Em (a) estão indicados os valores assumidos inicialmente e em (b) e (c) as aproximações sucessivas até a solução satisfatória (d).

O método de Cross também se aplica vantajosamente ao estudo dos reservatórios nas rês de distribuição.

A tendência atual em engenharia sanitária é de aplicá-lo ao estudo dos sistemas de canalizações principais das rês de abastecimento, relegando aos métodos menos precisos (do círculo, do contôrno ou das secções) a investigação das linhas secundárias.

#### Método do Analizador Elétrico

No método do analisador elétrico aproveita-se a analogia existente entre uma rês de distribuição de água potável e uma de condutores elétricos, para se construir um modelo elétrico da rês, no qual cada trecho é representado por uma resistência. Nesse modelo elétrico as tensões representam as perdas de carga e as intensidades das correntes as vazões, escolhidas convenientemente as escalas. Deve-se observar não ser o sistema elétrico perfeitamente análogo ao hidráulico, pois no primeiro as tensões são proporcionais às intensidades das correntes, ao passo que no segundo as perdas de carga variam aproximadamente com

a segunda potência das vazões. Por êsse motivo não é possível representar cada elemento da rede hidráulica por uma resistência elétrica constante; a resistência deve variar com a intensidade da corrente, de modo que, para cada condição de carga, a relação entre a tensão e a intensidade da corrente seja tal que as correspondentes perda de carga e vazão satisfaçam a equação de escoamento em condutos forçados que tiver sido adotada (\*).

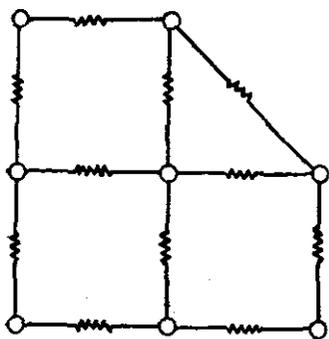


Fig. 9 — Método do Analisador Elétrico

Hazen tentou construir lâmpadas com filamentos tais que, com o aquecimento constituíssem resistências variáveis e controláveis, de modo a facilitar o ajustamento do modelo elétrico.

Há a considerar que o equipamento empregado é dispendioso e que a análise é relativamente demorada.

### Método do Modelo Hidráulico

Aos engenheiros que se dedicam tanto às pesquisas de laboratório como às investigações teóricas, a dificuldade apresentada pelo analisador elétrico levou a solução que na realidade teria sido a mais indicada de início: Construir um modelo da rede a ser analisada, no qual a similitude fôsse estritamente hidráulica.

A grande vantagem do modelo, uma vez estabelecidas as escalas, é a de permitir a verificação do comportamento da rede sob condições variadas, enquanto que a análise rigorosa ou aproximada requer novas suposições para cada condição de partida. Uma outra vantagem, inerente a todos os modelos hidráulicos, é a de permitir verificar visualmente e com elevada precisão as condições realmente existentes no sistema.

As redes de abastecimento podem ser reproduzidas por um sistema malhado de pequenos tubos de borracha, nos quais a resistência ao escoamento pode ser ajustada por meio de grampos munidos de parafusos. Em cada nó da rede instala-se um tubo piezométrico, de vidro.

Admitindo-se a fórmula de Hazen e Williams e a notação já usada, têm-se para o modelo:

$$h_m = r_m Q_m^{1.85} \quad (2)$$

e para o prototipo:

$$h_p = r_p Q_p^{1.85} \quad (3)$$

(\*) Lucas Nogueira Garcez, "Da condição de mínimo custo nos condutos forçados", Tese, 1946, p. 93.

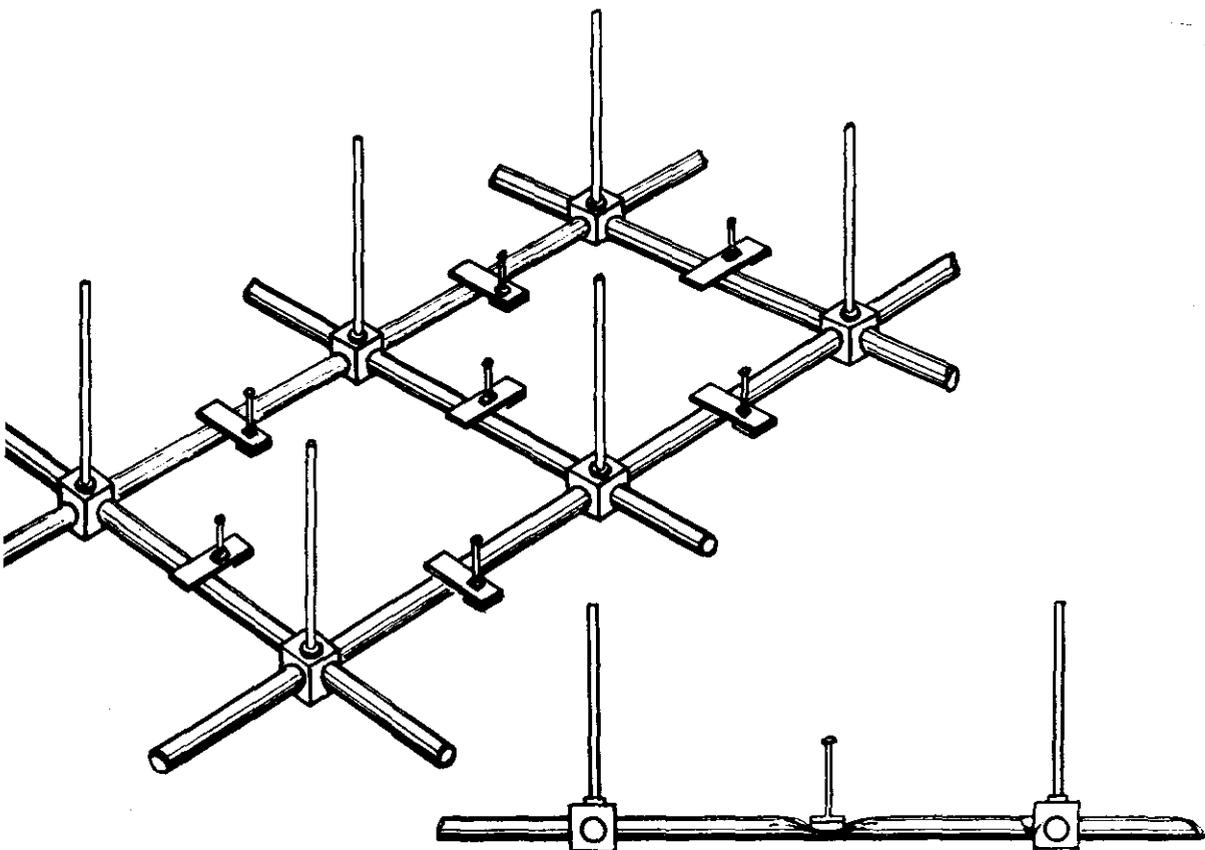


Fig. 10 — Método do Modelo Hidráulico

Sendo:

$$R_h = \text{escala para as perdas de carga} = \frac{h_m}{h_p}$$

$$R_Q = \text{escalas das vazões} = \frac{Q_m}{Q_p}$$

$$R_r = \text{escala para o fator de resistência} = \frac{r_m}{r_p}$$

dividindo-se a equação (2) pela (3) encontra-se a seguinte relação fundamental:

$$R_h = R_r R_Q^{1.85}$$

Segundo informa o professor Thomas, que vem conduzindo esses trabalhos na "Graduate School of Engineering" da Universidade de Harvard, cada canalização pode ser reproduzida em escala em poucos minutos e a reprodução de um sistema não muito grande tomaria cerca de uma hora apenas.

## INDICAÇÃO BIBLIOCRÁFICA SOBRE O ASSUNTO:

*Condutos Equivalentes e Método Gráfico de Freeman*

- H. E. BABBITT, J. J. DOLAND, Water Supply Engineering, McGraw-Hill Book Co., second edition, second impression, pp. 429-432, 1931.
- E. W. STEEL, Water Supply and Sewerage, McGraw-Hill Book Co., pp. 134-136, 1938.
- W. E. HOWLAND, F. FARR Jr., Computation of Equivalent Lengths of Parallel Pipe Systems, Journal of the American Water Works Association, Vol. 33, pp. 237-245, 1941.
- G. M. FAIR, Hydraulic Investigation of Water Distribution Systems in Field and Office, Journal of the New England Water Works Association, Vol. 55, pp. 293-296, June 1941.
- C. V. DAVIS, Handbook of Applied Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., p. , 1942.
- O. C. D., Water Works Engineering in Disaster, a Technical Manual, Appendix F, 1943.
- H. W. CLARK, Charts for Determining Equivalent Pipes and Loop Flow Distribution, Water Works and Sewerage, Reference and Data Edition, pp. 83-86, 1945.
- J. R. ARBUTHNOT, Chart for Determination of Equivalent Pipes, Water and Sewerage Works, Vol. 93, N.º 8, pp. 306-307, Aug. 1946.
- J. R. FREEMAN, The Arrangement of Hydrants and Water-pipes for Protection of a City against Fire, Journal of the New England Water Works Association, Vol. 7, pp. 49, 152, 1892.
- W. E. HOWLAND, Expansion of the Freeman Method for the Solution of Pipe Flow Problems, Journal of the New England Water Works Association, 48, p. 408, 1934.
- E. H. ALDRICH, Solution of Transmission Problems of a Water System, Transactions, of the American Society of Civil Engineers, 103, 1579, 1938.

*Método do Círculo*

- H. E. BABBITT, J. J. DOLAND, Water Supply Engineering McGraw-Hill Book Co., second edition, second impression, pp. 432-435, 1931.
- F. E. TURNEAURE, H. L. RUSSEL, Public Water Supplies, John Wiley & Sons Inc., pp. 667-668, 1940.
- E. W. STEEL, Water Supply and Sewerage, McGraw-Hill Book Co., pp. 136-137, 1938.
- O. C. D. Water Works Engineering in Disaster, a Technical Manual, Appendix G, 1943.
- W. D. HURST, Design of Distribution Systems, Journal of the American Water Works Association, Vol. 37, pp. 403-404, Appendix, April 1945.

*Método do Contorno, das zonas, ou de Pardoe*

- W. S. PARDOE, Computing Head Loss in Gridiron Distribution System, Engineering News-Record, Vol. 93, N.º 13, pp. 516-517, 1924.
- E. W. STEEL, Water Supply and Sewerage, McGraw-Hill Book Co., pp. 138-140, 1938.

*Método de Hazen, ou das secções*

- G. M. FAIR, Hydraulic Investigation of Water Distribution Systems in Field and Office, Journal of the New England Water Works Association, Vol. 55, pp. 284-288, June 1941.

*Método de Hardy Cross*

- HARDY CROSS, Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors, Engineering Experimental Station, University of Illinois, Bulletin 286, November 1936.
- J. J. DOLAND, Simplified Analysis of Flow in Water Distribution System, Engineering News-Record, Vol. 117, pp. 475-477, Oct. 1, 1936.
- G. M. FAIR, Analyzing Flow in Pipe Networks, Engineering News-Record, Vol. 120, p. 342, March 3, 1938.
- E. R. DODGE, Diagrams for Use with Cross Method Simplifies Solution of Flow Networks, Civil Engineering, pp. 350-351, May 1938.
- E. W. STEEL, Water Supply and Sewerage, McGraw-Hill Book Co., Appendix B, 1938.
- H. E. BABBITT, J. J. DOLAND, Water Supply Engineering, McGraw-Hill Book Co., pp. 382-389, 1939.
- L. C. URQUHART, Civil Engineering Handbook, McGraw-Hill Book Co., pp. 824-826, 1940.
- C. K. HURST, Distribution System Analysis in Edmonton, Journal of the American Water Works Association, Vol. 32, pp. 2038-2051, Dec. 1940.
- W. A. HARDENBERGH, Water Supply and Purification, International Textbook Co., pp. 209-223, 1941.
- H. G. PAYROW, Sanitary Engineering, International Textbook Co., pp. 177-183, 1941.
- W. E. HOWLAND, F. FARR Jr., Balancing Head Losses in a Pipe Network, Engineering News-Record, Vol. 126, p. 330, Feb. 1941.
- G. FARNSWORT, A. ROSSANO Jr., Application of the Hardy Cross Method to Distribution System Problems, Journal of the American Water Works Association, Vol. 33, pp. 224-233, 1941.
- G. M. FAIR, Hydraulic Investigation of Water Distribution System in Field and Office, Journal of the New England Water Works Association, 55, 271-306, June 1941.
- GEORGE M. SLIGHT, Chart for Balancing Pipe Head Losses by the Hardy Cross Method, Engineering News-Record, Vol. 128, pp. 61-62, Jan. 1942.
- W. D. HURST, N. S. BUBBIS, Application of the Hardy Cross Method to the Analysis of a Large Distribution System, Journal of the American Water Works Association, Vol. 34, N.º 2, 1942.
- J. F. MUIR, Analyzing Flow from Multiple Reservoirs by the Hardy Cross Method, Engineering News-Record, Vol. 128, pp. 408-409, March 1942.
- C. V. DAVIS, Handbook of Applied Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., p. 728, 1942.
- D. R. TAYLOR, The Hardy Cross Method, Water Works and Sewerage, Reference and Data Edition, 1943.
- O. C. D., Water Works Engineering in Disaster, a Technical Manual, pp. 76-86, 1943.
- T. F. O'CONNOR, A Rapid Method of Analyzing Flow in Water Distribution Systems based on the Theory Developed by Professor Hardy Cross, Proceedings of the Maryland-Delaware Water and Sewerage Association, pp. 61-83, 1943.

*Método do Analizador Elétrico*

- COLLINS AND JONES, Bachelor's Thesis, M. I. T., 1933.
- T. R. CAMP, H. L. HAZEN, Hydraulic Analysis of Water Distribution Systems by means of an Electric Network Analyzer, Journal of the New England Water Works Association, 48, p. 383, 1934.
- C. V. DAVIS, Handbook of Applied Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., p. 727, 1942.

*Método do Modelo Hidráulico*

- O. C. D., Water Works Engineering in Disaster, a Technical Manual, pp. 86-91, 1943